

# NEOTECTÓNICA EN LA PAMPA NORTE (ARGENTINA)

E. Brunetto<sup>1</sup> y M.H. Iriondo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CIC y TTP-CONICET, Centro de Investigaciones Científicas y de Transferencias Tecnológicas a la Producción, España y Materi s/n, 3105 Diamante, Provincia de Entre Ríos, Argentina. ebrunetto@yahoo.es

<sup>2</sup> CONICE-CC 487, 3100 Paraná, Provincia de Entre Ríos, Argentina.

**Resumen:** En la uniformidad de la llanura pampeana central de Argentina aparecen manifestaciones del paisaje que señalan la existencia de actividad neotectónica. El análisis de lineamientos estructurales y la identificación de unidades geomorfológicas y rasgos topográficos, a partir de la interpretación de imágenes de satélite y observaciones de campo, permitieron delimitar los bloques que conforman la región. La información de superficie fue correlacionada con aquella que fue obtenida del subsuelo a partir de la interpretación de testigos y perfiles geofísicos de perforaciones, como también del registro de resistividades eléctricas del terreno. Dicha correlación ha permitido establecer el carácter neotectónico de la deformación y deducir la existencia de movimientos relativos entre bloques estructurales. En consecuencia, se han establecido al menos dos episodios de actividad. El primero, de mayor jerarquía, afectó a los sedimentos de ambientes de transición y continentales que recubren los depósitos marino-someros de la Fm Paraná (Mioceno superior). Por su parte, las variaciones laterales de facies entre ambientes de lagunas temporales y depósitos eólicos típicos de la Fm Tezanos Pinto, marcan discontinuidades que se correlacionan con los rasgos lineales observados en superficie. La modificación que ejercieron dichos elementos estructurales sobre la dirección del drenaje superficial permite inferir la existencia de deformaciones durante el Pleistoceno Superior.

**Palabras claves:** Neotectónica, unidades morfoestructurales, llanura Pampeana.

**Abstract:** Expressions of the landscape that appear on the large smooth surface of the central pampean plain in Argentina, point out the presence of neotectonic activity. The studied area is covered by deposits of fluvial belts and fans, lacustrine sediments and an extensive loess blanket, all of them belonging to the Quaternary. These deposits constitute the upper stratigraphic column at the distal part of the foreland basin, located to the east of the Sierras Pampeanas Orientales. Neogene strains from the flat subduction of the Nazca plate underneath the South American plate are widely distributed in the Andean foreland, beneath central western Argentina (28°-33° latitud S). Therefore, geotectonic conditions of this portion of the active continental margin are in correspondence with the particular behaviour of the intraplate region, evidenced by presence of regional N- S tectonic lineaments that caused the appearance of the laguna Mar Chiquita and large shallow lagoons aligned in the distal area of the Río Dulce alluvial fan. Structural analyses of lineaments and the identification of geomorphologic units and topographic features, starting from the interpretation of satellite images and field observations, have allowed indicating limits of the blocks that shape the region and define morphostructural domains. Furthermore, the surface information was correlated with that obtained by means the interpretation of data from drill holes, as well as the electric resistivity record of the ground. This correlation allowed establish the neotectonic character of the deformation and deduce the existence of relative movements in structural blocks. As a consequence, at least two activity episodes have been established. The first one, of more hierarchy, affected to the sediments of transition and continental environments overlying marine-shallow deposits of the Paraná Fm (Upper Miocene). On the other hand, lateral variations between wetlands facies and typical aeolian deposits of the Tezanos Pinto Fm, mark discontinuities which are correlated with the linear features observed in surface. Existence of deformation can be inferred for Late Pleistocene from disruptions in the superficial drainage.

**Key words:** Neotectonics, morphostructural units, Pampa plain.

Brunetto, E. e Iriondo, M.H. (2007): Neotectónica en la Pampa norte (Argentina). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 20 (1-2): 17-29.

La región de la llanura pampeana ubicada en el centro de Argentina, cuenta con investigaciones abordadas desde variadas perspectivas y con diversos objetivos. Pero el desarrollo de los estudios sobre neotectónica ha sido modesto y presenta importantes desafíos que pueden ser abordados empleando las

herramientas clásicas de la geología. Dada la naturaleza de los datos utilizados y las condiciones estratigráficas de la región, en el presente trabajo se considera neotectónica a la actividad estructural vertical y horizontal post-miocena, siguiendo el criterio desarrollado por Vita-Finzi (1996). Un hecho aceptado

es la existencia de la transgresión marina paranaense que ocurrió durante el Mioceno superior según Herbst y Zabert (1987) o Mioceno medio-tardío más temprano, según Cione y Tonni (1995). De este modo, dicho evento representado por la Fm Paraná, configura un límite temporal adecuado para la inscripción de los procesos vinculados a actividad neotectónica.

El área de estudio está comprendida entre los 29° 30' y 31° 00' de latitud S y los 61° 30' y 63° 00' de longitud O, cubriendo un área de aproximadamente 30.000 km<sup>2</sup>. Este sector pertenece a la región de la llanura que ha sido definida por Iriondo (1994) con el nombre de Pampa Norte, por su identidad estratigráfica y geomorfológica durante el Cuaternario que la diferencia de las regiones vecinas. El patrón sedimentario durante el Plio-Pleistoceno fue similar al presente, caracterizado por abanicos aluviales avanzando desde las Sierras Pampeanas hacia el este, en dirección a los valles fluviales del río Paraná, y mantos eólicos formados por vientos provenientes del sur, que constituyeron el Sistema Eólico Pampeano. El carácter conspicuo de la Pampa Norte es la presencia de una Faja Periférica de Loess, conformada por secuencias de depósitos de loess y paleosuelos, que se desarrollaron durante el Pleistoceno superior.

Desde el punto de vista de las interrelaciones complejas entre procesos geomorfológicos y sistemas biológicos, es una zona caracterizada por la presencia de numerosos humedales, en donde se observan diferentes estadios de evolución de sus elementos constituyentes (Iriondo, 2004). Estos ambientes han dominado los períodos climáticos húmedos del Cuaternario.

En la regularidad de la extensa llanura Pampeana aparecen dos morfoestructuras particulares y notorias que evidencian rasgos tectónicos en el paisaje. Por un lado la depresión de la laguna Mar Chiquita presenta una forma pentagonal y sus límites oeste y sur son netos

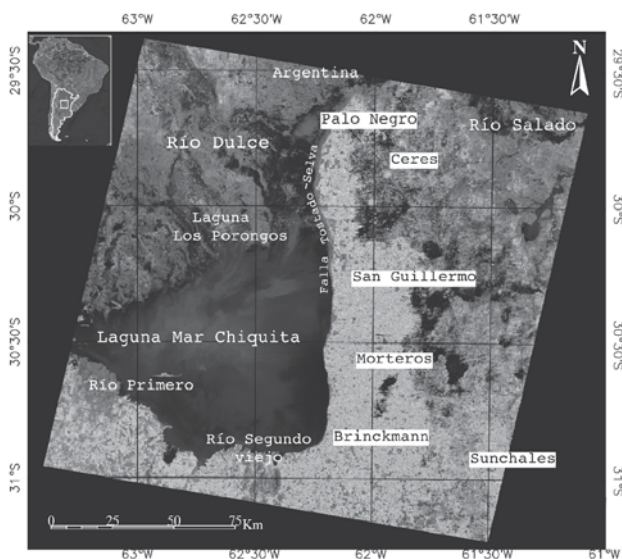
y rectilíneos. Por otra parte, se diferencia un sector elevado en el centro de la región, limitado por elementos estructurales lineales. El límite entre estas dos expresiones es un lineamiento denominado Falla Tostado Selva, el cual posee un carácter regional con orientación general N-S y aproximadamente 400 km de longitud (Fig. 1).

Desde el punto de vista geotectónico, la región estudiada es considerada un amplio antepaís distal que ha sido dominado durante el Cenozoico tardío por una dinámica de esfuerzos compresivos, los que se han propagado por todo el continente, incluso su borde atlántico (Chebli *et al.*, 2000).

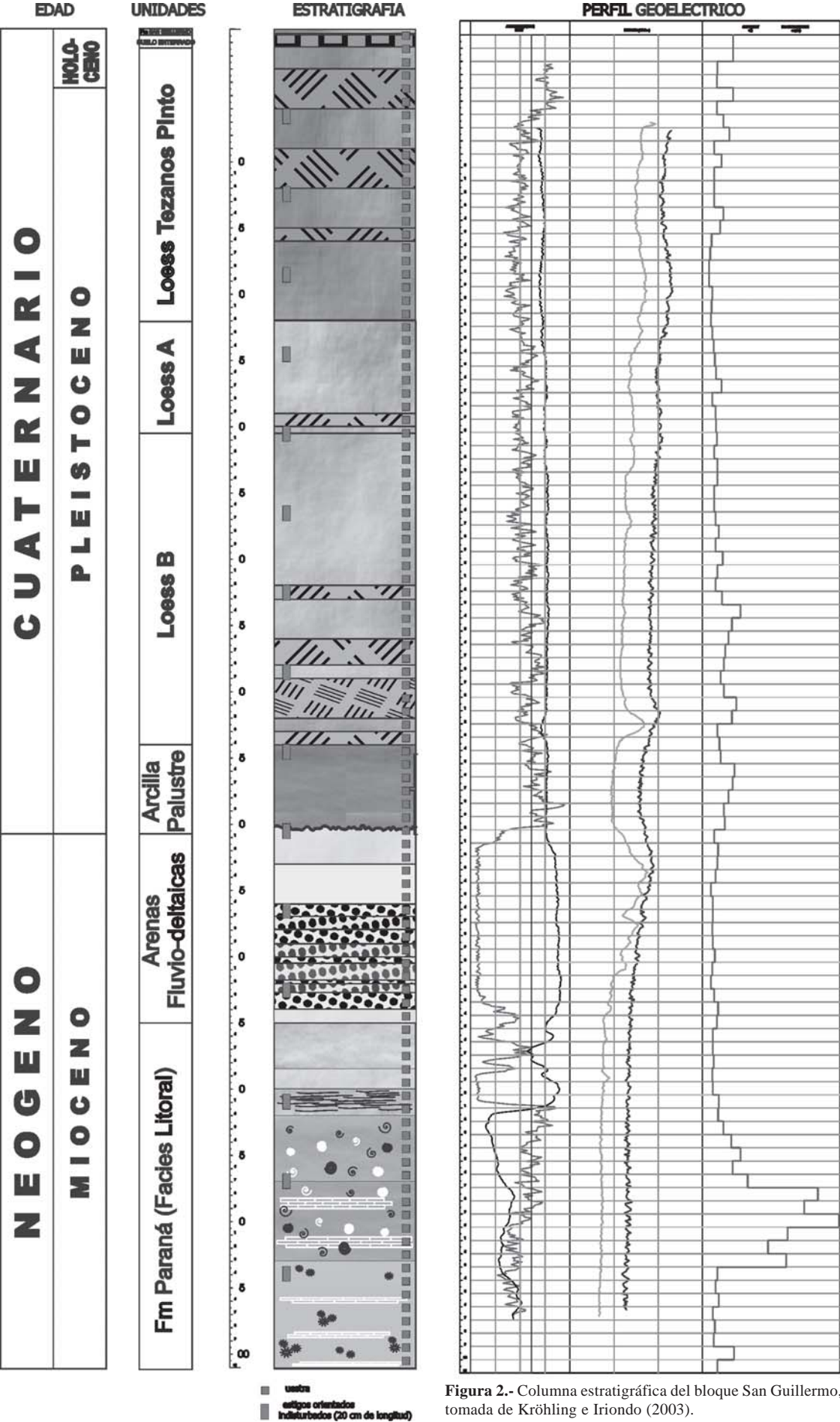
### Antecedentes

La identificación de las grandes fracturas de orientación N-S, deducidas geológicamente a partir de las perforaciones realizadas por Stappenbeck (1926) es un antecedente de actividad neotectónica en las planicies de Córdoba y Santa Fe. Este autor propuso un origen post-Plioceno para la cuenca estructural de la laguna Mar Chiquita. Por su parte, Passotti (1974) sustentó la existencia de actividad tectónica cuaternaria a partir del análisis de fotografías aéreas y mapas topográficos, proponiendo que las dislocaciones en bloques por movimientos de reactivación de fracturas de basamento, provocaron modificaciones en las redes hidrográficas pleistocenas. Castellanos (1959) propuso un esquema hipotético de los cambios y desplazamientos de las paleo-redes hidrográficas a lo largo del Cuaternario, invocando causas tectónicas y climáticas. Otro antecedente en esta materia es la identificación de las principales fracturas de la llanura Chaco-Pampeana realizada por Iriondo (1987, 1989), quien ha propuesto una edad Pleistoceno medio para la falla Tostado-Selva a partir de la posición estratigráfica relativa de los estratos afectados y considerando interpretaciones regionales de la evolución geológica durante el Cuaternario.

Kröhling e Iriondo (2003) describieron la columna estratigráfica representativa del área elevada, a partir del análisis sedimentológico y mineralógico de los testigos inalterados obtenidos en una perforación de investigación realizada en la localidad de San Guillermo (Fig. 2). Definieron a esta unidad morfoestructural con el nombre de bloque San Guillermo. En el mencionado trabajo, los autores interpretaron que este bloque mayor fue el borde occidental de la Fm Ituzaingó depositada por el Paraná durante el Plioceno-Pleistoceno inferior. Debido a las características de la perforación y los análisis realizados a sus muestras, la información obtenida posee mayor confiabilidad, por lo tanto en el presente trabajo los mencionados resultados son considerados como la información de base para interpretar y correlacionar la estratigrafía del subsuelo de la región a través e la información ofrecida por otras perforaciones.



**Figura 1.-** Mapa de ubicación sobre la base de la composición en falso color (bandas 7-4-1) de una imagen Landsat ETM-7.



■ arena

■ estigmas orientados

■ indurados (20 cm de longitud)

Figura 2.- Columna estratigráfica del bloque San Guillermo, tomada de Kröhlng e Iriondo (2003).



## Materiales y Métodos

Mediante el análisis visual de imágenes de satélite Landsat TM y el análisis de hojas topográficas 1:50.000 y 1:250.000 (Instituto Geográfico Militar), se obtuvo una clasificación geomorfológica a la misma escala, siguiendo el sistema de clasificación de llanuras propuesto por Iriondo (1987). El mapa geomorfológico obtenido integra además de la información previa existente (Kanter, 1935, Iriondo, 1987; Kröhling e Iriondo, 1999), clasificaciones generadas a partir del tratamiento digital de imágenes Landsat ETM7 (path/row: 228/80 y 228/81) y las observaciones realizadas en el campo.

En el presente trabajo se toma como base el mapa de lineamientos morfológicos y la definición de dominios estructurales, realizado por Brunetto (2005). En ese análisis fue empleada la técnica de confección de una «trama densa» de lineamientos y, posteriormente, de un mapa de lineamientos simplificados, cuyo objetivo fue discriminar rasgos que muestran persistencia espacial a escala 1:250.000.

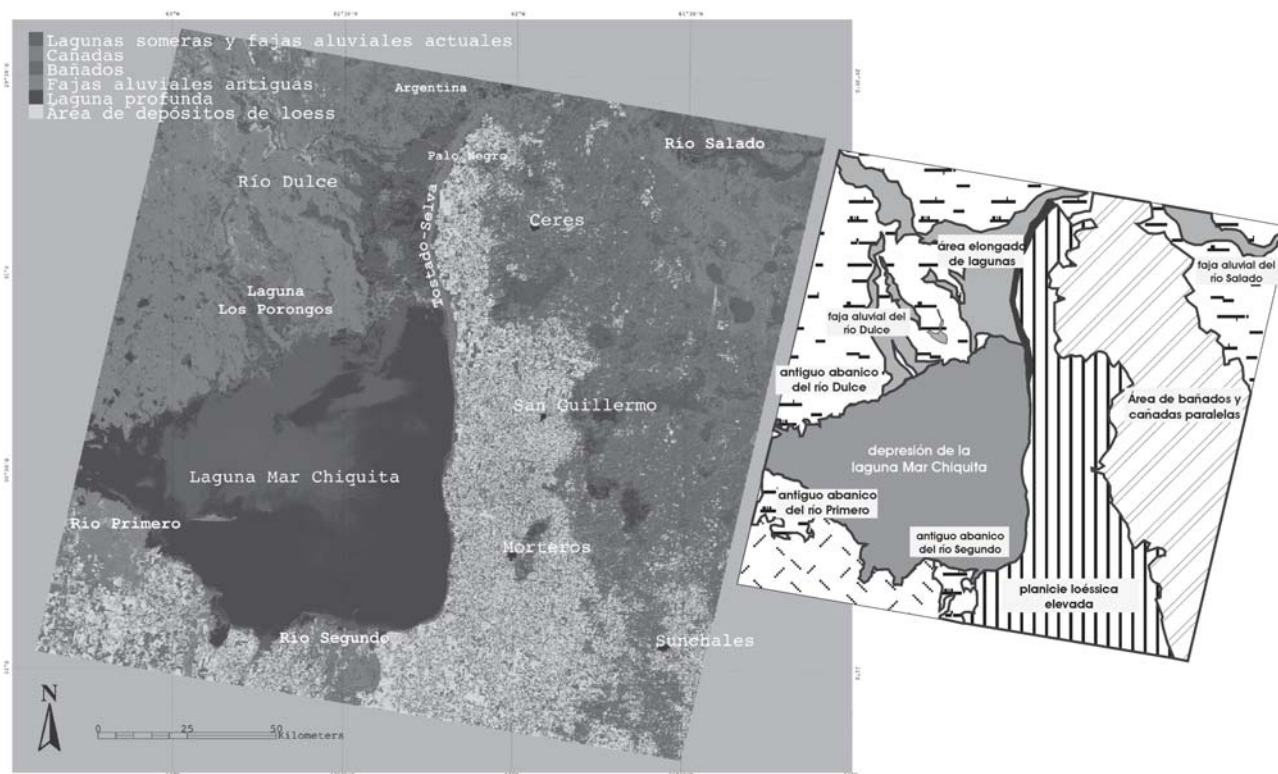
Por otra parte, el procesamiento de imágenes DEM con resolución de 90m (SRTM-NASA), permitió identificar lineamientos que resultan de la aproximación de segmentos rectos a los límites de áreas de igual altitud media. Dichas áreas surgen de la representación de curvas de nivel obtenidas con una equidistancia de 2 m. A partir de imágenes DEM también se confeccionaron perfiles topográficos. Los perfiles fueron suavizados mediante la aplicación de filtros matemáticos que

suprimen parte del ruido de la adquisición de los datos altimétricos obtenidos por el sensor.

Además se establecieron las correlaciones estratigráficas a partir del conocimiento disponible proveniente de perforaciones, perfiles geofísicos y estudios de resistividad eléctrica del terreno. La interpretación y correlación de la información de subsuelo permitió realizar los análisis preliminares en tres dimensiones en orden a detectar evidencia de movimientos relativos entre los bloques estructurales. La información de subsuelo se obtuvo a partir de un censo de pozos de profundidades someras (en el orden de los 20 m) y de perforaciones de más de 100 m de profundidad, construidos con fines hidrogeológicos.

## Mapa Geomorfológico

La cartografía geomorfológica del área de estudio aportó información directa e indirecta de la actividad neotectónica (Fig. 3). Dicha área pertenece al primer nivel de clasificación denominado «Llanura de agradación». A esta jerarquía corresponde la denominada Pampa Norte (Iriondo, 1994). Considerando los 2° y 3° órdenes de clasificación, se definieron unidades geomorfológicas caracterizadas por limos depositados por el viento, arenas fluviales y limos arcillosos con precipitados químicos frecuentes propios de la dinámica de lagunas temporales («bañados»). Así, la región está integrada por tres unidades principales: laguna Mar Chiquita, bloque San Guillermo y sector distal del abanico aluvial del Río Dulce (Fig. 1).



**Figura 3.-** Esquema geomorfológico regional obtenido mediante la clasificación digital de una imagen Landsat ETM-7. Los depósitos de loess bien drenados están diferenciados de los depósitos eólicos afectados por la presencia de bañados y cañadas. Estas unidades están limitadas por rasgos lineales regulares. El esquema representa las unidades geomorfológicas definidas siguiendo el sistema de clasificación de Iriondo (1987).

La Depresión de la Laguna Mar Chiquita posee un evidente origen tectónico indicado por la regularidad de sus límites, los cuales son más nítidamente percibidos durante el actual periodo de nivel alto de las aguas.

Los antiguos abanicos de los ríos Primero y Segundo fueron generados por los desplazamientos de canales distributarios en el área distal de estas cuencas, antes de su desembocadura en la laguna. A través del procesamiento de imágenes de satélite se puede apreciar la existencia del antiguo abanico aluvial del río Segundo. La faja aluvial actual del río Primero muestra valles encajados en la planicie fluvio-eólica y un patrón de canal conformado por segmentos rectos.

El sector distal de la cuenca del Río Dulce es parte de una serie de bloques hundidos y está constituido por dos unidades geomorfológicas características. Una de ellas es el abanico aluvial del Río Dulce, el cual presenta un patrón de drenaje enrejado controlado por fracturación. Los elementos geomorfológicos más conspicuos que aparecen en esta unidad son los «bañados» o humedales. Se trata de ambientes de lagunas temporales alimentadas por aguas de lluvia o por descargas relacionadas con crecidas del río principal a través de sus canales distributarios. Poseen amplia distribución superficial y gran diversidad biológica. El valle principal se desarrolla a lo largo de un área hundida de orientación general N-S, la cual está limitada por lineamientos compuestos por segmentos de orientaciones predominantemente NNO-SSE y NNE-SSO (Fig. 4). Al este de la zona relativamente hundida, se extiende un área elongada de lagunas, de claro origen tectónico y orientación general N-S. Durante los periodos de nivel alto, la laguna Mar Chiquita se extiende hacia el norte inundando este sector. Más al norte aún, esta serie de lagunas alineadas está controlada estructuralmente por lineamientos que adquieren allí una orientación NE-SO (Fig. 4). De esta forma se conforma una conexión entre las cuencas de los ríos Dulce y Salado.

En el campo, el contraste que registra el paso desde la pampa elevada de loess hacia el talud de la falla Tostado-Selva más allá de Palo Negro, resulta bien marcado. En el talud, la vegetación de tipo bosque chaqueño es muy tupida, mientras que es notable la presencia de eflorescencias salinas. El alto contenido de humedad en el loess marca el afloramiento del nivel freático. Hacia el sector más bajo del transecto comprendido entre Palo Negro y Argentina (Figs. 1 y 3) aparecen encharcamientos y espejos de agua. El número y la superficie de estas lagunas se incrementan, extendiéndose tanto hacia el norte como hacia el sur de la ruta. Estas observaciones confirman aquellas realizadas a través de las imágenes de satélite a partir de las cuales se deduce el control de lineamientos N-S sobre un bloque relativamente más hundido, comprendido entre la zona de Argentina y el talud de la falla Tostado-Selva (Figs. 1 y 3). Hacia el sur y apoyando la existencia de una estructura de bloques

longitudinales, existe un sector alto, no anegable, situado entre la laguna de los Porongos y el área de lagunas alineadas al NE de la laguna Mar Chiquita.

El valle aluvial del río Salado muestra un fuerte control estructural en el segmento localizado al NE de la localidad de Argentina, con valles aluviales que forman ángulos rectos siguiendo las direcciones de las principales fracturas de extensión regional.

En el sector oriental de la región definimos dos unidades geomorfológicas comprendidas dentro la unidad mayor denominada bloque San Guillermo. Por un lado, una planicie loésica elevada, limitada al oeste por el escarpe de la falla Tostado-Selva. La imagen de satélite muestra que esta unidad está constituida por suelos que poseen un buen drenaje y mayor aptitud para los cultivos. Hacia el este, se extiende el área de lagunas temporales y ramblas paralelas, la cual presenta un patrón de drenaje paralelo controlado por fracturación. Las orientaciones de las denominadas «cañadas» (cauces intermitentes similares a ramblas, arroyos o barrancos), están determinadas por familias de fracturas. A medida que los cursos se adaptan a ellas adquieren una geometría sigmoidal. Actualmente, la mayor parte de estos arroyos están canalizadas artificialmente, respetando en general el patrón natural. En esta planicie existen lagunas que se acomodan en pequeñas depresiones de origen tectónico. La imagen de satélite procesada evidencia un cambio neto en las condiciones de drenaje hacia la zona baja situada al este, donde los suelos retienen un mayor contenido de humedad. El límite de esta unidad con la vecina anteriormente descrita, está marcado por lineamientos persistentes en la dirección NNO-SSE y se evidencia claramente por el contenido de humedad de los sedimentos. Este sector está cubierto en gran parte por los depósitos correspondientes a la Fm San Guillermo (Iriondo, 1987), caracterizados por su composición de loess pardo grisáceo típico. Fue depositada durante el Holoceno superior. Esta unidad puede ser identificada en el campo, a través de numerosos cortes del terreno realizados durante la canalización de ramblas o barrancos que aparecen a intervalos regulares. Sobre dicha formación se han desarrollado los horizontes de los suelos actuales.

### Análisis de lineamientos

Mediante el análisis visual de las texturas y colores de imágenes de satélite, especialmente de agua y vegetación, Brunetto (2005) definió los lineamientos de primer orden que dan la configuración general al área y nueve dominios con características estructurales homogéneas, probablemente vinculados a actividad neotectónica (Fig. 4). En el campo se observaron rasgos que caracterizan estas unidades y estructuras.

La falla Tostado-Selva definida por Pasotti y Castellanos (1963) y descrita por Iriondo (1989), es la principal estructura y es el límite entre el bloque elevado de San Guillermo y los bloques hundidos del

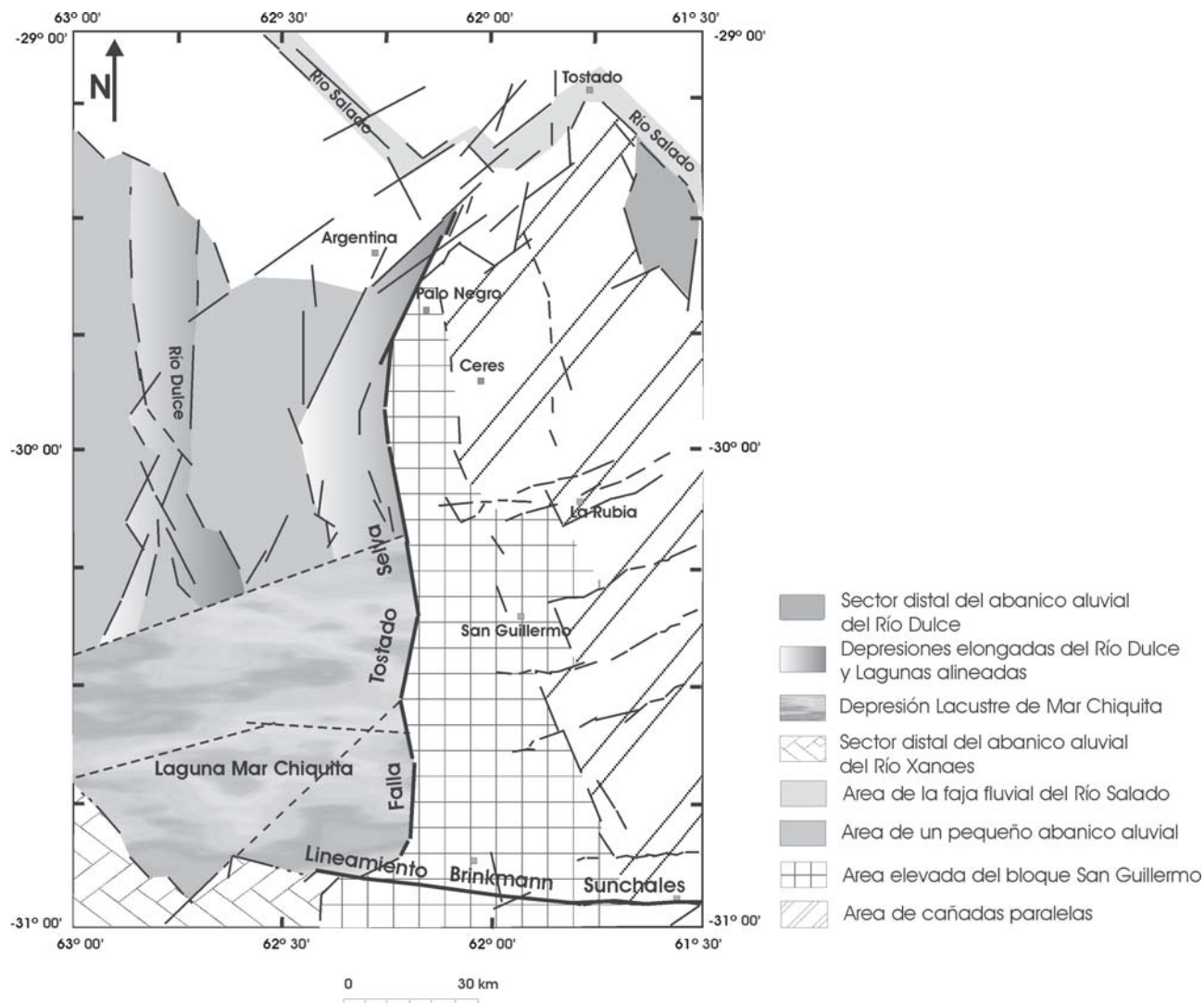


Figura 4.- Dominios morfoestructurales.

abanico del río Dulce y la depresión lacustre de Mar Chiquita (Fig. 4). Está conformada por segmentos menores de decenas de kilómetros y orientaciones aproximadas a la dirección N-S. La mayor expresión morfológica de la falla es un escarpe que alcanza más de 30 m de desnivel y está situado en el sector adyacente a la costa SE de la laguna Mar Chiquita. Las trazas de los segmentos lineales definidos sobre el talud del escarpe, en algunos sectores aparecen menos marcadas y algo curvadas por la acción erosiva, señalando un control pasivo de la estructura sobre el relieve. En otros tramos, adquieren una marcada regularidad, sugiriendo eventos de reactivación de menor jerarquía. La existencia de la falla está comprobada por los rechazos de hasta 30 m observados en las perforaciones realizadas a uno y otro lado del lineamiento, tomando los niveles de pelitas verdes de la Fm Paraná y los depósitos de arenas sobre yacientes como marcadores estratigráficos.

El lineamiento Sunchales-Brinkmann (Iriondo, 1987) de orientación general E-O, ejerce un marcado control sobre la geometría del margen SE de la laguna Mar Chiquita (Fig. 4). Más al este, en el punto de

ingreso a la localidad de Sunchales, se observa un talud que presenta una diferencia de nivel de aproximadamente 7 m. Este rasgo es posiblemente indicativo de la existencia de un escarpe de falla. La información en superficie es insuficiente para determinar el tipo de control ejercido por dicha estructura sobre el talud. En las secciones siguientes la información se subsuelo aporta elementos a favor de su origen neotectónico (Plioceno-Cuaternario), en el sentido asumido en el presente trabajo.

### Geoeléctrica

En la presente contribución se efectuó el análisis de un mapa de zonación de resistividades correspondiente al área circundante a la localidad de Sunchales, confeccionado a partir de los resultados de 88 sondeos eléctricos verticales realizados por la CEA (1979). El mapa muestra la delimitación de zonas de igual resistividad media, correspondientes a los horizontes geoeléctricos superiores (hasta 25-30 m). Desde el punto de vista hidrogeológico, este estrato representa el acuífero de mejores condiciones de calidad de aguas.



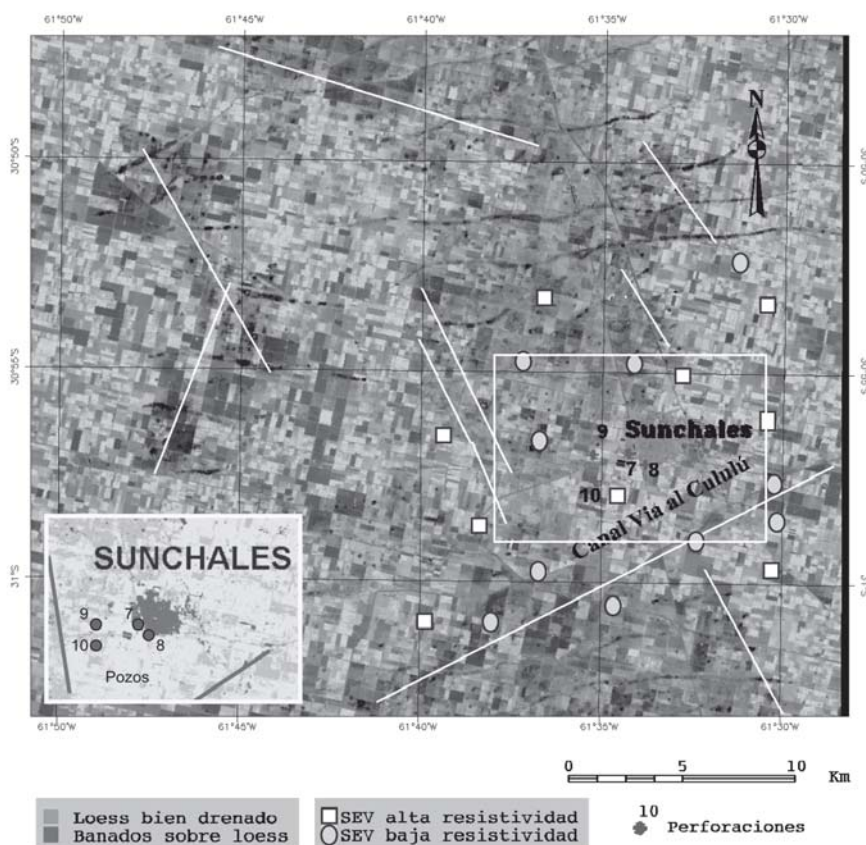
Debajo de él, subyace un nivel de bajas resistividades originadas en la presencia de sedimentos con mayor contenido de arcillas, y mayores salinidades del agua intersticial. La interpretación de facies y los espesores de estratos obtenidos a través de las curvas geoeléctricas están en correspondencia con los resultados de la observación e interpretación de sondeos y perfiles de pozos someros y profundos. Esas descripciones sedimentológicas y la respuesta geofísica observada indican que la unidad superior corresponde a la Fm. Tezanos Pinto. Por su parte, el análisis de resistividades reales señala variaciones laterales de facies dentro de esta unidad litológica. Los valores de resistividades más bajos ( $< 8 \text{ ohm.m}$ ) representan una disminución de las condiciones de permeabilidad, por el mayor contenido de la fracción arcilla, concreciones de carbonato de calcio y nódulos de manganeso. Estas características corresponden a la presencia de facies de humedales temporales que afectaron al sustrato depositado por el viento. Los valores mayores de resistividades eléctricas ( $> 19 \text{ ohm.m}$ ) representan mejores condiciones hidrogeológicas, por la presencia de limos eólicos, texturalmente más gruesos y más porosos. La zonación geoeléctrica representada en superficie muestra una buena correlación espacial con la demarcación de lineamientos y elementos geomorfológicos resultantes de la clasificación digital de imágenes de satélite (Fig. 5). Sobre un total de 19 S.E.V. analizados, el 89% de los registros presenta una buena correlación entre los valores altos y bajos de resistividades eléctricas y los sectores bien drenados y

los sectores anegables, respectivamente, los cuales están delimitados por lineamientos. Por lo tanto se puede deducir la presencia de discontinuidades estructurales indicadas por las variaciones laterales de facies.

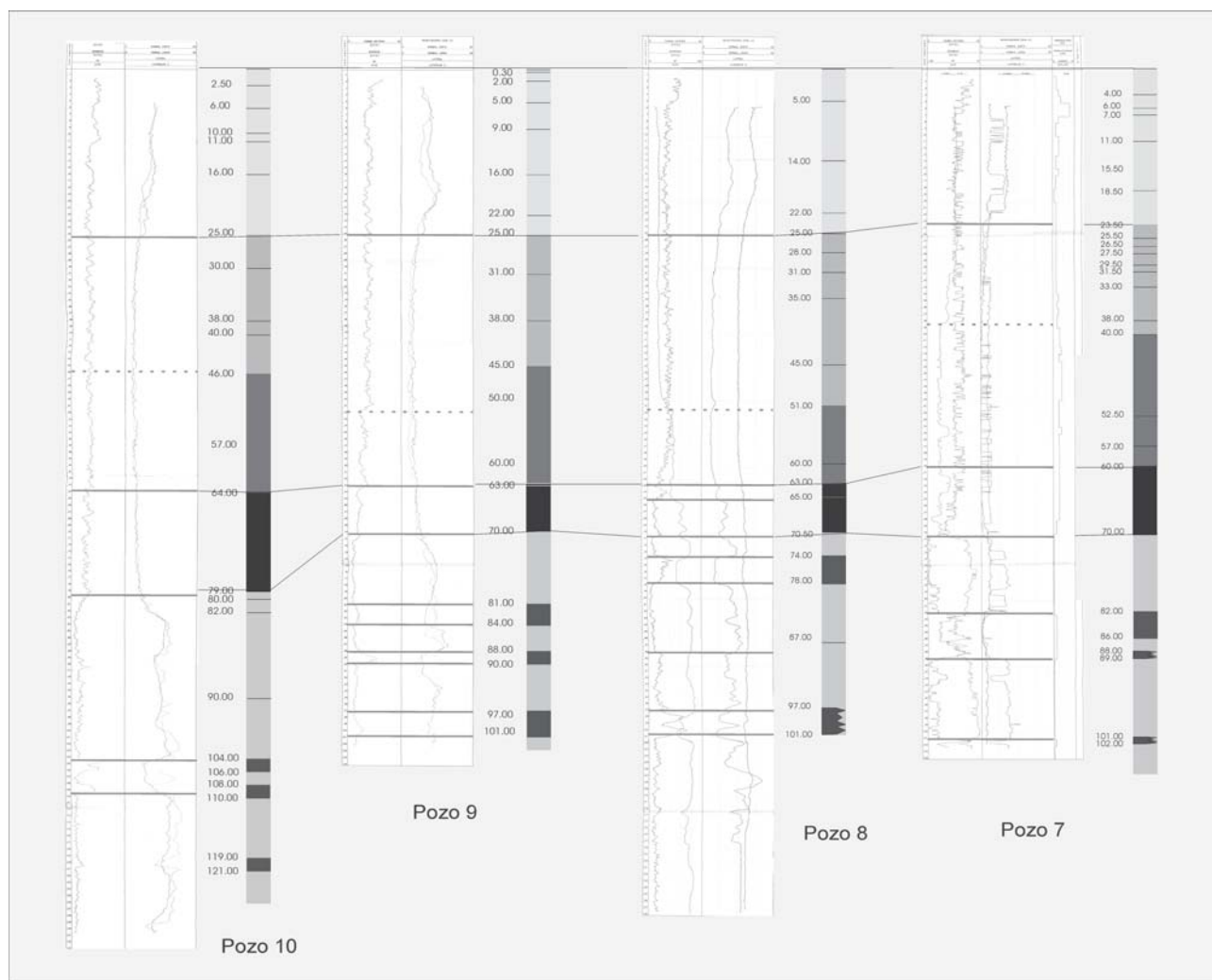
### Perforaciones en el área de Sunchales

La información derivada de siete perforaciones de más de 100 m de profundidad realizadas en la localidad de Sunchales, fue analizada e interpretada en el presente trabajo. Sobre la base de las descripciones de sedimentos y las curvas de los perfiles geofísicos, se definen aquí las siguientes unidades litoestratigráficas y las profundidades entre las cuales se encuentran sus límites. Éstas muestran un rango de variación en las diferentes perforaciones. Cuatro de las columnas ubicadas en al oeste de la ciudad (Fig. 5), son presentadas y correlacionadas en la figura 6.

- *Sedimentos comprendidos entre profundidades de 2 m en el techo y 22-25 m en la base.* Limos friables de color castaño amarillento con contenido variable de arcillas y presencia de concreciones de carbonato de calcio. Estos sedimentos muestran un comportamiento más permeable, deducido de los valores mayores de resistividad. Esta descripción corresponde a la Formación Tezanos Pinto.
- *Sedimentos comprendidos entre profundidades de 22-25 m en el techo y 60-64 m en la base.* Limos de estructura poliédrica con



**Figura 5.-** Los lineamientos que controlan la presencia de bañados desarrollados sobre depósitos eólicos correspondientes a la parte superior de la columna de loess, muestran buena correlación con los valores de resistividades eléctricas medios obtenidos a partir de SEV. Las perforaciones N° 7, 8 y 9 están situadas al norte de la cañada Sunchales que marca la posición del lineamiento regional Sunchales-Brinkmann (Fig. 4), mientras que la perforación N° 10 se ubica 500 m al sur.



**Figura 6.-** La correlación de columnas estratigráficas interpretadas a partir de las perforaciones en el área de Sunchales (ver Fig. 5) evidencia una discontinuidad lateral en la posición estructural del piso de la unidad de arcillas verdes plásticas. El desnivel de 9 m aparece con respecto a la perforación N° 10, situada 500 m al sur de la cañada Sunchales.

abundantes concreciones de carbonato de calcio y presencia de nódulos de manganeso. Se caracterizan por un incremento en la frecuencia de las intercalaciones de niveles que contienen mayor proporción de minerales de arcillas. Estos son identificados en los perfiles que registran radiación gamma natural. La presencia de nódulos de manganeso en algunos niveles puede ser considerada como indicadora de condiciones de ambiente de lagunas y humedales temporales. Este segmento de la columna se caracteriza por un decrecimiento de los valores de resistividades en los perfiles normales de espaciamiento corto y largo, señalando una reducción de la permeabilidad. La posición estratigráfica y los espesores observados en los niveles comprendidos entre los 22-25 m y los 60-64 m sugieren una equivalencia de estos sedimentos con la secuencia loésica observada en la columna estratigráfica de San Guillermo, asignada a depósitos del Cuaternario (Kröhling e Iriondo, 2003; Fig. 2).

Estos depósitos han sido afectados por procesos de inundación y pedogénesis durante los períodos húmedos.

- *Sedimentos comprendidos entre profundidades de 60-64 m en el techo y 70-79 m en la base.* Transicionalmente hacia abajo se destaca un nivel guía de arcillas muy plásticas de color verde, con concreciones de carbonato de calcio, depositado bajo una dinámica de pantano permanente. Este nivel tiene amplia distribución espacial y aparece como un nivel guía en las perforaciones profundas de la región.
- *Sedimentos comprendidos entre profundidades de 70-79 m en el techo y 80-82 m en la base.* En contacto neto en el techo, aparecen niveles de arenas finas a medianas de color amarillento y niveles de arenas gruesas con gravilla de color amarillento claro. La presencia de arenas produce un incremento marcado y claro en los valores de resistividad. En los pozos ubicados en una posición más al sur,



tanto el contacto del techo como el de la base aparecen a mayores profundidades. Es posible que este desnivel del orden de los 10 m corresponda al rechazo de una falla en la posición del lineamiento Sunchales-Brinkmann (Fig. 4).

- *Sedimentos comprendidos entre profundidades de 80-82m en el techo y 104-138 m en el fondo de los pozos.* Arenas de finas a gruesas, arcillosas, de colores verdes a grises se presentan interestratificadas con arcillas verdes muy plásticas de espesores que oscilan entre 2 y 4 m. Hay una clara correlación inversa entre los perfiles de resistividad y los de radiación gamma natural, señalando la mayor presencia de arenas y de arcillas respectivamente. Esta unidad es correlacionable con facies de ambientes marino someros de la Fm Paraná (Herbst y Zabert, 1987).

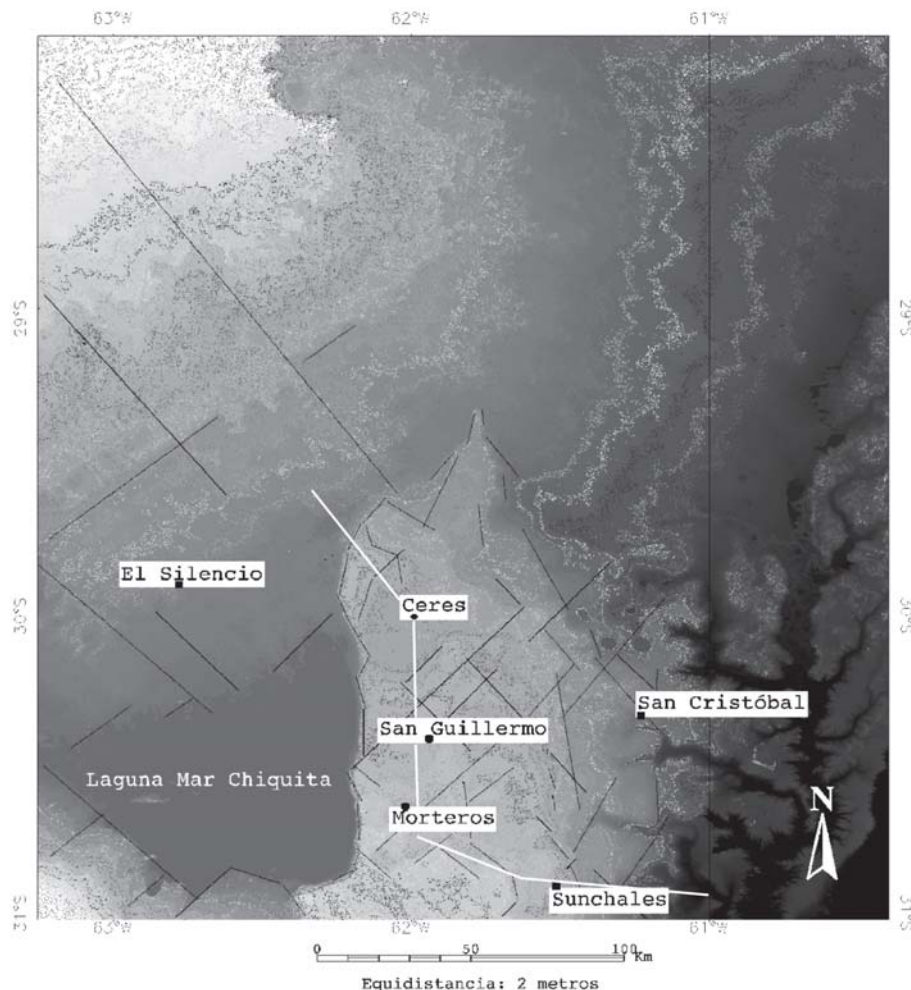
### Correlación regional de la información de perforaciones

El análisis de las perforaciones censadas en la región de estudio muestra por debajo de la columna loésica, la presencia de un estrato de arcillas verdes característico, asignado a condiciones de ambiente de pantano permanente (Kröhling e Iriondo, 2003) de edad

Plioceno o Pleistoceno inferior estimada por su posición estratigráfica. La actitud horizontal y persistente en toda la región de este nivel, sugiere un paisaje con tendencia a la subsidencia, dominado por humedales durante los períodos climáticos húmedos. La correlación de la cota a la cual aparece dicho nivel en los distintos puntos explorados, permite observar las variaciones verticales de la posición relativa entre los bloques del basamento, asumiendo que estos depósitos corresponden a un ambiente que dominó la región. En Sunchales, el piso del nivel guía palustre aparece a 24.5 msnm en las perforaciones 7, 8 y 9 (Fig. 6), situadas al norte del lineamiento Brinkmann-Sunchales. En cambio, en la perforación N° 10 ubicada 500 m al sur de esa posición (Fig. 5), el piso del horizonte palustre se encuentra a 15 msnm. Este desnivel de 9.5 m puede ser indicador de un desplazamiento relativo entre los bloques situados al norte y al sur del lineamiento y una evidencia de que esa estructura corresponde a una falla. Esta observación está en correspondencia con la presencia del talud observado al sur de la ciudad de Sunchales.

En la localidad de San Guillermo, las arcillas verdes se encuentran en una posición relativa más elevada, donde el piso aparece a 35 msnm (espesor de 6 m). También en Morteros las posiciones relativas son más elevadas con respecto a Sunchales, aunque más bajas con relación al nivel guía en el subsuelo de San

**Figura 7.-** La rectificación de curvas de nivel, obtenida a partir de una imagen DEM (SRTM-NASA) con equidistancia de 2 m, revela la existencia de bloques menores dentro del bloque San Guillermo. A partir de su correlación con la información estratigráfica del subsuelo pueden deducirse movimientos relativos entre estos bloques, posteriores a la deposición del nivel guía de arcillas palustres. La traza de color blanco corresponde a la ubicación del perfil representado en la figura 8.

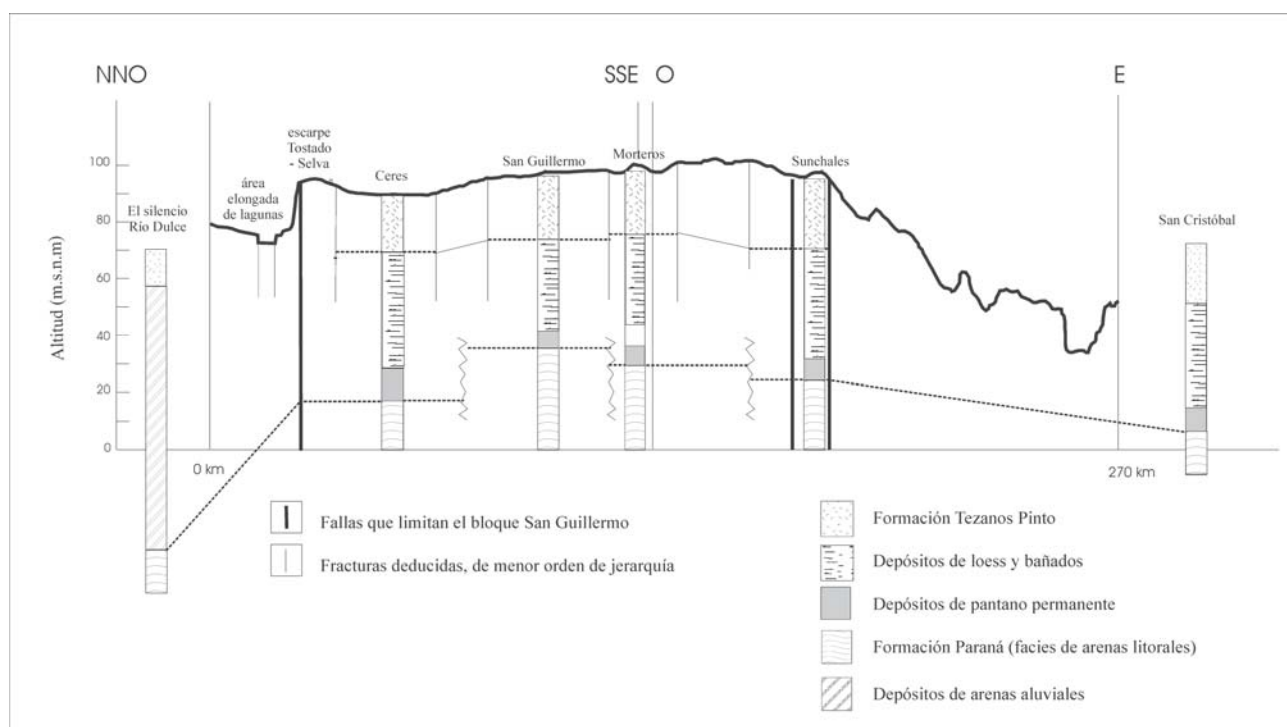


Guillermo. El horizonte se encuentra a 29 msnm (espesor de 6 m), coincidiendo con las cotas respectivas observadas en Rafaela. Contrariamente, en Ceres el nivel palustre se encuentra en una posición estratigráfica inferior, con el piso ubicado a 16.7 msnm (espesor de 11 m). Este análisis preliminar indica que los bloques menores que componen el bloque San Guillermo han sufrido movimientos relativos sub-verticales posteriores a la acumulación de los sedimentos de pantano permanente, de amplia distribución espacial aunque de edad precisa aún desconocida. Estos sedimentos representan una etapa donde el área estuvo deprimida y posteriormente fue estructuralmente afectada. La interpretación surge de la integración de la correlación estratigráfica y los datos de lineamientos obtenidos a partir de la clasificación geomorfológica y la rectificación de curvas de nivel (Figs. 3, 5 y 7). El sector de la localidad de San Guillermo fue elevado con relación a las áreas de Ceres y Morteros, a partir de movimientos concentrados en fracturas de orientación general NE-SO y NO-SE (Fig. 7). A su vez, en el perfil topográfico suavizado se observa una correspondencia general entre puntos de cambio de pendiente y la posición de los lineamientos identificados previamente, reflejando la presencia de sectores ligeramente deprimidos (Fig. 8).

## Discusión

Aunque fuera considerada como un área continental estable, hay numerosas evidencias en favor de la existencia de actividad tectónica cuaternaria en esta

región. Ejemplos de fallas cuaternarias han sido documentados recientemente para la región de las Sierras Pampeanas Orientales a partir de localidades con evidencias directas, las que han sido estudiadas por distintos autores y enumeradas por Massabie y Szlafsztein (1991) y Costa *et al.* (2001). Es actualmente conocido que los esfuerzos neógenos generados a partir de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa sudamericana, están ampliamente distribuidos en el antepaís andino como resultado de subducción sub-horizontal de la placa en el segmento centro-oeste de la Argentina (latitud entre 28° y 33° S) (Costa *et al.*, 2001). En ese marco de evolución geotectónica de la región, tanto el orógeno andino como el sector sudoriental de las Sierras Pampeanas en latitudes próximas a los 33° S, tuvieron el pico de la deformación neógena durante el Plioceno-Pleistoceno (Costa *et al.*, 2001), extendiéndose desde los 2.6 Ma hasta la actualidad (Ramos *et al.*, 2002). En consecuencia, a partir de las condiciones geotectónicas de esta porción del margen continental activo, puede esperarse en este segmento latitudinal del antepaís distal un comportamiento asociado al carácter particular de la subducción sub-horizontal, durante el Cenozoico tardío. Para Castellanos (1959) y Mon y Gutiérrez (2005) la presencia de un paleocauce localizado al sur de la laguna Mar Chiquita y orientado en la dirección de la rambla de San Antonio, debió corresponder a la descarga del río Dulce hacia el Paraná. Esta observación constituye un indicador del carácter neotectónico de la estructura que impide el drenaje y dio origen a la laguna Mar Chiquita. Las



**Figura 8.-** Perfil topográfico y estructural del bloque San Guillermo. La correlación estratigráfica evidencia los movimientos relativos entre bloques menores. El perfil topográfico fue obtenido a partir de la información de un modelo digital del terreno (SRTM-NASA) suavizado mediante filtro matemático. Véase la ubicación del perfil en la figura 7.

manifestaciones morfoestructurales señaladas se extienden en dirección N-S, con una longitud aproximadamente coincidente con la extensión de las Sierras Pampeanas más orientales.

Según las síntesis de la evolución regional realizadas por algunos autores, los principales lineamientos observados en la llanura Pampeana y la Mesopotamia son sistemas de fallas o fallas simples que corresponden a antiguas zonas de debilidad del basamento y fueron reactivadas, generando un estilo tectónico de bloques con componentes diferenciales de movimiento vertical. Para ellos, estos patrones de fracturación siguen activos, afectan a la cubierta cuaternaria y producen significativos controles sobre el drenaje (Chebli *et al*, 1989; Iriondo, 1989).

Passotti (1974) identificó una paleored fluvial pleistocena en la llanura del sur de la provincia de Santa Fe (de edad Lujanense) con diseño de drenaje orientado de SO a NE y terminación de los ríos y ramblas en el río Paraná. La paleored fluvial corresponde al sistema de barrancos paralelos. Según la autora las deformaciones ocurridas desde el Pleistoceno superior influyeron en la configuración de las redes actuales, produciendo impedimentos al drenaje e inflexiones de los cursos hacia el N y el S. Los resultados obtenidos en el área de Sunchales se corresponden con dicha interpretación donde el sistema de ramblas intermitentes paralelas adquiere una orientación general OSO-ESE. Sobre ese diseño, se superponen humedales temporales y lagunas de formas elongadas. Éstas presentan bordes netos con orientaciones NNO-SSE, canalizando el drenaje actual en esa dirección. Es evidente la modificación que ha sufrido la red de ramblas más antigua. Si se considera además que la tasa de sedimentación del loess durante los períodos extremos secos del Pleistoceno superior fue mayor que la tasa de movimiento, y que en este sector elevado de la pampa ha dominado la erosión areolar durante los períodos húmedos, se deduce que los rasgos lineales observados sobre la superficie han conservado su regularidad debido a la existencia de deformación actual o reciente. En caso contrario, sedimentación eólica y erosión areolar deberían haber producido la disipación de los rasgos del relieve tan marcadamente lineales y regulares, como también habrían suavizado las pendientes donde se observan inflexiones coincidentes con dichos rasgos. La columna de loess tiene una potencia de hasta de 20 m en su tramo superior, de manera que dada la potencia que estos depósitos tienen en el interior del bloque San Guillermo es posible pensar que los procesos erosivos habrían nivelado el paisaje si se tratara de un ambiente completamente inactivo. En consecuencia y aunque no pueda establecerse aún una cronología más precisa de su ocurrencia, a partir de la observación de cambios en la dirección y en los impedimentos al drenaje, como a partir de la persistencia de la regularidad de rasgos lineales puede inferirse la existencia de un control

activo sobre el paisaje del sector de la llanura estudiado, ejercido por actividad tectónica, durante el Pleistoceno superior. Futuras investigaciones de geomorfología cuantitativa orientadas a examinar la evolución de taludes correspondientes a la presencia de rasgos lineales, como así también estudios geofísicos para evaluar en subsuelo la actitud y continuidad lateral de los niveles de depósitos de lagunas temporales, deberán aportar nuevos elementos al estudio de la actividad tectónica cuaternaria en la región.

Por otra parte, a pesar de la existencia de extensivos modelos teóricos, el campo de esfuerzos de intraplaca en América del Sur es poco conocido, por lo que aún no se han establecido claramente cuáles son las fuerzas dominantes motoras de la placa sudamericana (Assumpção, 1998). Sin embargo, sobre la base de compilaciones de datos de esfuerzos, modelos numéricos de campo de esfuerzos y resultados geodésicos espaciales a escala continental, se ha propuesto que la placa sudamericana se encuentra actualmente bajo un régimen de compresión horizontal y acortamiento (Lima, 2000). También se conoce que los movimientos ocurren de manera episódica, por acumulación de tensiones en las rocas de la corteza y liberación de energía cuando los umbrales de resistencia son alcanzados. Por lo tanto, en ambientes de intraplaca pueden discriminarse eventos de deformación que presentan duraciones menores que las transcurridas durante períodos de quietud (Park, 1988). El área de estudio no posee evidencias directas lo cual dificulta la interpretación de la naturaleza de la deformación y las direcciones de esfuerzos dominantes. Sin embargo, las observaciones de modificaciones en la dirección del drenaje, con orientaciones dominantes NNO-SSE, sugieren inversión del relieve por fracturación de bloques y suave basculamiento en sentido perpendicular ENE. Esta dirección de basculamiento es coincidente con la dirección de esfuerzos regionales, propuesta para esta parte de la intraplaca, a partir de modelos numéricos a escala continental (Coblentz y Richardson, 1996), especialmente en el modelo que prioriza el efecto de la fuerza de empuje de la dorsal mesoatlántica. Además de las componentes regionales, otras fuentes locales de esfuerzo, como tensiones flexurales en la corteza debido a la carga de sedimentos sobre la plataforma y la carga tectónica por engrosamiento cortical en zonas de acortamiento, son muy importantes y en algunos casos pueden ser mayores que las tensiones regionales (Assumpção, 1998). En cuencas flexurales como las subandinas, una activa subsidencia limita la agradación diferencial de sedimentos a lo largo de depresiones estructurales y depocentros (Dumont, 1996). Este pudo ser el mecanismo dominante durante extensos períodos del Neógeno-Cuaternario de la región provocando subsidencia y arqueamiento en la parte más distal del antepaís fragmentado del orógeno andino.



## Conclusiones

A partir de las manifestaciones morfogenéticas del paisaje y la identificación de lineamientos de primer orden y dominios de comportamiento estructural homogéneo, pueden definirse unidades morfoestructurales vinculadas a la existencia de bloques afectados por actividad neotectónica en el área central de la llanura Pampeana, denominada Pampa Norte.

Existen evidencias obtenidas a partir de las correlaciones estratigráficas de que esta actividad afectó a los sedimentos de ambiente marino somero de la Fm Paraná y los depósitos de ambientes de transición y continentales que la recubren. Dicha evidencia de deformación surge de la correlación de la posición en la que se encuentra el piso del nivel guía de arcillas palustres muy plásticas, observado en la mayor parte de las perforaciones realizadas en la región. Este sedimento representa una etapa de pantano permanente de amplia extensión y ha sido afectado por movimientos relativos de los bloques que configuran el área. Por su parte, el estudio de las variaciones laterales de facies eólicas y palustres en el subsuelo, a través de la interpretación de información geoelectrónica y su correlación con las manifestaciones morfogenéticas en superficie, son indicios de actividad tectónica reciente. Estos indicadores afectan a los depósitos de la Fm Tezanos Pinto, depositada durante el final del Pleistoceno.

De esta manera la evolución estructural de la región está caracterizada por actividad neotectónica de primer orden desde el Plioceno que dio la configuración general de la región. Existen indicios de que la tectónica ejerció un control activo sobre el desarrollo de las redes de drenaje durante el Cuaternario.

Aún así el conocimiento disponible sobre eventos de deformación ocurridos durante el Plioceno-Cuaternario en la región es insuficiente, y será necesario obtener nueva información para una más ajustada ubicación temporal de dichos eventos. Además deberán realizarse nuevas investigaciones tendientes a profundizar la naturaleza de las deformaciones y los esfuerzos actuantes.

## Agradecimientos

El trabajo fue financiado parcialmente por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET-Argentina). Los autores agradecen al Ing. E. Pedrotti de la Cooperativa de agua potable de Sunchales, Sociedad Ltda., por la provisión de la información de subsuelo. Se agradece a la Dra. D. Kröhling, por la colaboración permanente.

## Referencias

Assumpção, M. (1998): Sismotectónica y esfuerzos en Brasil. *Física de la Tierra*, 10: 149-166.  
 Brunetto, E. (2005): Mapa de Lineamientos Morfológicos de la cuenca inferior del Río Dulce, Laguna Mar Chiquita y blo-

que San Guillermo. En: *XVI Congreso Geológico Argentino*. Actas, 4: 545-552.  
 Castellanos, A. (1959): Posibles desplazamientos morfológicos en el pasado, de las redes potamográficas en la llanura cordobesa. *Separata del Boletín de Estudios Geográficos*, 19: 29-63. Córdoba  
 Chebli, G.A., Tofalo, O., Turzzini, G.E. (1989): Mesopotamia. En: *Cuencas Sedimentarias Argentinas* (G.A. Chebli y L.A. Spalletti, Eds.). Serie Correlación Geológica, Instituto Superior de Correlación Geológica. Universidad Nacional de Tucumán, 6: 79-100.  
 Chebli, G., Mozetic, M., Rossello, E. y Bühler, M. (2000): Cuencas sedimentarias de la llanura Chacopampeana. En: *Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales* (R. Caminos, Ed.). Anales 29, Buenos Aires, 20: 627-644.  
 Coblenz, D.D. y Richardson, R.M. (1996): Analysis of the South American intraplate stress field. *Journal of Geophysical Research*, 101 (B4): 8643-8657.  
 Costa, H.C., Murillo, M.V., Sagripanti, G.L. y Gardini C.E. (2001): Quaternary intraplate deformation in the southeastern Sierras Pampeanas, Argentina. *Journal of Seismology*, 5: 399-409.  
 Dumont J.F., (1996): Neotectonics of Subandes-Brazilian craton boundary using geomorphological data: the Marañón and Beni basins. *Tectonophysics* 257: 137-151.  
 Herbst, R. y Zabert, L. (1987): Microfauna de la Formación Paraná (Mioceno superior) de la Cuenca Chaco-Paranaense (Argentina). *FACENA*, 7: 165-206.  
 Iriondo, M. (1987): Geomorfología y Cuaternario de la Provincia de Santa Fe (Argentina). *D'Orbignyana*, 4: 1-54.  
 Iriondo, M. (1989): Major fractures of the Chaco-Pampa plain. En: *Bulletin of the INQUA, Neotectonics Commission*. N.A. (N. Mörmér, Ed.), 12: 42.  
 Iriondo, M. (1994): Los climas cuaternarios de la región pampeana. *Comunicaciones del Museo Provincial de Ciencias Naturales Florentino Ameghino*, 4: 1-48.  
 Iriondo, M. (2004): Large wetlands of South America: a model for Quaternary humid environments. *Quaternary International*, 114: 3-9.  
 Kanter, H. (1935): La cuenca cerrada de la Mar Chiquita en el norte de la Argentina. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba*, 32: 285-322.  
 Kröhling, D.M. e Iriondo, M.H. (1999): Upper Quaternary Paleoclimates of the Mar Chiquita area, North Pampa, Argentina. *Quaternary International*, 57/58: 149-163.  
 Kröhling, D.M. y Iriondo, M.H. (2003): El loess de la Pampa Norte en el Bloque de San Guillermo. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología*, 10 (2): 137-150.  
 Lima, C.C. (2000): Ongoing compression across intraplate South America: observations and some implications for petroleum exploitation and exploration. *Revista Brasileira de Geociências*, 30 (1): 203-207.  
 Massabie, A.C. y Szlafsztein, C.F. (1991): Condiciones Geomecánicas y Edad del Fallamiento Geotectónico en las Sierras Pampeanas Orientales, Córdoba, Argentina. *Actas de la Asociación Argentina de Geología Aplicada e Ingeniería*, VI: 154-168.  
 Mon, R. y Gutiérrez, A. (2005): The neotectonic origin of the natural dam of Mar Chiquita, Córdoba, Argentina. Abstract in: *Holocene environmental catastrophes in South America: from the lowlands to the Andes*; ICSU DARK NATURE-IGCP 490. Third Joint Meeting, Mar Chiquita, Córdoba: 33.  
 Park, R.G. (1988): Intraplate tectonic regimes. En: *Geological*

- Structures and Moving Plates*, Blackie Academic & Professional, 189-209.
- Pasotti, P. y Castellanos, A. (1963): El relieve de la llanura santafesino-cordobesa comprendida entre los paralelos 32° y 32° 30'S desde 62° 45'W hasta el río Paraná. *Publicaciones del Instituto de Fisiografía y Geología de la Universidad Nacional de Rosario*, 47: 1-79.
- Pasotti, P. (1974): La Neotectónica en la Llanura Pampeana. Fundamentos para el mapa neotectónico. *Publicaciones del Instituto de Fisiografía y Geología de la Universidad Nacional de Rosario*, 58: 28 p.
- Ramos, V.A., Cristallini, E.O. y Pérez, D.J. (2002): The Pampean flange-slab of the Central Andes. *Journal of South American Sciences*, 15: 59-78.
- Stappenbeck, R. (1926): *Geología y aguas subterráneas de la pampa*. Ed. Pangea, Córdoba, 490 p.
- Manuscrito recibido el 23 de agosto de 2006*  
*Aceptado el manuscrito revisado el 26 de marzo de 2007*